

管道寬度對於電動不穩定性的影響

張文俊¹、謝易庭^{1,*}、嚴考豐²、駱文傑³
W-C-CHANG¹, I-T-HSIEH¹, K-F-YARN² and W-J-LUO³

¹ 南台科技大學電子工程系

¹ Department of Electronic Engineering, Southern
Taiwan University of Technology, Taiwan, ROC

² 遠東科技大學電子工程系

² Department of Electronic Engineering, Far East University,
Hsin-Shih, Tainan, Taiwan, ROC

³ 國立勤益科技大學冷凍空調系

³ Department of Refrigeration and Air Conditioning, National
Chin-Yi University of Technology, Taichung, Taiwan, ROC

E-mail : *itingsieh0321@gmail.com

摘要

電動不穩定(EKI)現象的發生是當微流體在一個外加高電場梯度驅動下而造成。本文於T字型管道中分別設計突張與突縮的管道，以探討管道寬度對於電動不穩定效應的影響。由實驗跟模擬中發現，對於較窄的管道，其產生電動不穩定效應的臨界電場強度可較小；反之，對於較寬的管道，其產生電動不穩定效應的臨界電場強度則較大。因此，要讓電動不穩定現象較快產生的話，則可設計突縮微管道來達成；而要讓此現象延遲產生的話，可設計突張微管道以達成。

關鍵字詞：電動不穩定(EKI),電場擾動,電導率

Abstract

EKI (Electro-kinetic Instability) phenomenon occurs under an operation condition while a higher electric field intensity which is greater than a threshold value is applied to a microfluidics within a microchannel. In this study, a T-type microchannel with sudden expansions and sudden contractions were design in order to investigate the channel width effect on the EKI phenomenon. It is found that the critical value of the electric field intensity can be reduced for the microchannel with sudden contractions. On the contrary, for the microchannel with sudden expansions, the critical value should be greater.

Keywords: Electrokinetic instability (EKI), Electrical field perturbation, Electrical conductivity

1. 前言

近幾年來，隨著微機電系統 (Micro-Electro-Mechanical-Systems, MEMS) 的迅速發展，對於傳統生醫或生化檢測儀器亦因而產生革命性的變化。利用微機電系統製程技術可將傳統的檢測儀器微型化，因此當可改善傳統檢測儀器攜帶不便的問題，同時亦可簡化檢測操作程序、降低試劑的消耗量及縮短檢測與分析的時間。

對於過去相關的研究，Melcher 和 Taylor [1] and Saville [2] 發展出歐姆模型，描述在零表面間電動效果的假設下面，流體電動的不穩定。在此模型中，此不穩定機制乃因在不同介質上的界面上所累積的電荷，因受到外加電場驅動所產生的流體移動影響，進而改變介質的電導分佈。Baygents 和 Baldessari [3] 執行了電滲流的分析，並考慮傳導擴散的效果，當外加的電場的強度超過了一個特定值的時候，流體會變成不穩定。Lin et al. [4] 考慮在一個長矩形截面管道中的電滲流，其中電導梯度與主要的流動方向垂直，同時電場被加在流體流動方向上。結果顯示，當電場強度超過了某一個臨界值，將造成流體系統極不穩定同時造成流體速度擾動與快速激擾效果。Chen et al. [5] 曾針對 T 型微管道的不穩定現象以線性穩定度分析的方法進行探討，應用 Bnggs-Bers 現象，將理論分析結果與實驗數據做比較決定不穩定模式與特性，並發現絕對不穩定的現象。分析結果顯示，影響電動不穩定現象的兩個主因控制參數為：動態力量與消散力量的比值，此比值會影響電動不穩定現象開始的時間以及電黏滯與電滲流速度比值，此比值會影響對流不穩定與絕對不穩定的特性。最近的研究中，由 Tai et al. [6] 和 Pan et al. [7] 提出 EKI 散佈流出的效應和與 EKI 整合的微流體晶片具無閥切換的流出效果，在微管道中可提高混合效率。

Luo et al. [8-10] 則利用電場擾動引起電動不穩定性增進 T 型微管道的混合效果。本篇論文使用數值模擬去觀察 T 型微管道注入系統中的電場擾動引起的 EKI 現象。且使用兩種電導性比值為 3.5:1 之電解液輸入微管道並通以直流 DC 電場，結果顯示，在 T 型微流道中供應的電場強度超過臨界值時，將由混合流道的入口處產生波動且不穩定的流動，使得兩種液體於下游處混合。之後 Zgang 等人於 2011 年發表 [11] 在一刀叉形 (branch) 微管道利用 induced-charge electrokinetic flow (ICEKF) 法在表面產生渦流，進而控制管道流速與濃度。實驗結果顯示，藉由控制傳導表面的大小，此微流體元件能同時產生相同流速和線性下降流速的功能。另外，Cho 等人於 2012 年 [12] 發表一非週期性時變 (aperiodic time-varying) EKI 為基礎的十字型微流體混合器模擬，此系統中是利用 Sprott 系統，產生非週期性振盪源來調變管道擾動電位。由模擬中發現混合效率可經由適當的幾何形狀與調整擾動參數而獲得改善。上述 Cho 等人後來又於 2012 年 [13] 發表矩形及波浪形之微流體管道研究，在矩形結構上針對不同長、寬形狀與 power-law model 下不同流體指數 (index) 做一有系統的模擬。模擬結果顯示矩形較波浪型有較佳的混合特性。然而，對兩種形式而言，在增加塊狀 (block) 長、寬下，混合效率卻是皆可以提升。

2. 微管道寬度對於臨界電場強度的影響

如圖所示，下圖(1)是單 T 型微管道示意圖，圖(2)管道寬是 $100\ \mu\text{m}$ 圖(4)管道寬是 $250\ \mu\text{m}$ ，主管道長度 $1500\ \mu\text{m}$ ，Y 方向之翼長度 $700\ \mu\text{m}$ 。外加直流電壓在入口管道處，並將混合管道出口處接地。對單 T 型微管道而言，兩種電解液，其中一個是低電導 ($0.11845\ \text{EC}$) 而另外一個是高電導 ($1.1845\ \text{EC}$)，電導度比值為 10:1 同時被分別注入兩入口處。

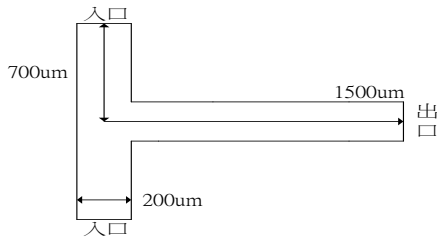


圖 1. 單T型微管道示意圖

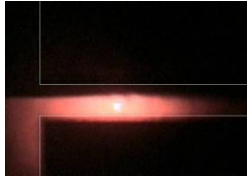


圖 2. 單T管道100 μm 386v/cm實驗圖

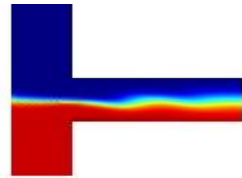


圖 3. 單T管道100 μm 386v/cm模擬圖



圖 4. 單T管道250 μm 390v/cm實驗圖

對單T型微管道內之流體流動，當外加電場強度較小時，兩股流體分別由兩入口處被驅動往管道交接處匯流並往下流流動，液體介面的寬度會漸漸擴展，並朝下游形成擴散混合，並形成有層次的濃度分佈狀態。在未達臨界電場時，此分層流動現象會持續往下游流去。在本研究下，對於100 μm寬的管道，臨界電場強度約為287v/cm。當外加電場強度為386v/cm(高於臨界值)加到管道入口上如圖(2)所示，在兩股流體的界面上產生不穩定波動，並慢慢的沿著管道下游持續前進放大。

圖(3)所示是模擬兩種不同電導度的流體在定直流電場強度386v/cm偏壓下，流體電導度

濃度分佈的暫態圖。藍色區域相當於低電導流體，而紅色區域代表高電導流體，在兩道流體的界面上出現較大的波動。出現在橫向與縱向上的不穩定流體導致兩種流體快速混合，此現象即為電動不穩定現象(EKI, electrokinetic Instability)。這些擾動愈往下游逐漸在形狀大小上擴大，並占滿整個管道形成一混沌狀態，微管道入口處將引發混沌不穩定現象在混合管道內。

比較T字形管道在不同管道寬度的臨界電壓，由表1實驗得知，管道寬度為100 μm的管道其臨界電場強度為287 v/cm，管道寬度為150 μm的管道其臨界電場強度為309 v/cm，管道寬度為200 μm的管道其臨界電場強度為318v/cm，管道寬度為250 μm的管道其臨界電場強度為368v/cm，由於在100 μm的管道中在管道截面上的電導濃度梯度變化較大，因此對於管道寬度為100 μm的管道，其臨界電場強度較其他管道寬度為最小，也就是說，對於較窄的管道，只需較小的電場強度即可達到電動不穩定的效果。

表 1. T型管道臨界電場強度

T型管道臨界電場強度		
寬度 μm	實驗 v/cm	模擬 v/cm
100 μm	287 v/cm	300 v/cm
150 μm	309 v/cm	305 v/cm
200 μm	318 v/cm	310 v/cm
250 μm	368 v/cm	315 v/cm

3. 突張與突縮T字型微管道對於臨界電場強度的影響

如圖所示，T字型微管道幾何結構：

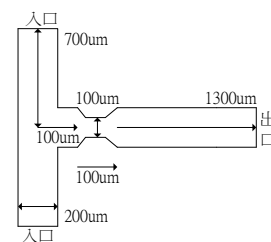


圖 5. 單T突縮管道示意圖

圖(5)單T突縮管道部分總長度跟管道寬度都跟單T管道一樣，差別在於管道交接處往下游100 μm 的地方，管道往內壓縮100 μm 長度為100 μm 其餘部分跟單T管道一樣。

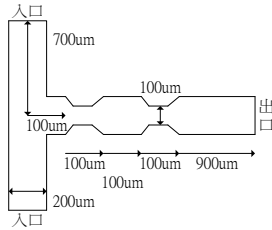


圖 6. 單T雙突縮管道示意圖

圖(6)單T雙突縮管道部分總長度跟管道寬度都跟單T管道一樣，差別在於管道交接處往下游100 μm 和300 μm 的地方，管道往內壓縮100 μm 長度為100 μm 其餘部分跟單T管道一樣。

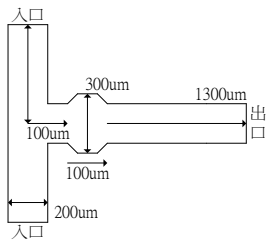


圖 7. 單T突張管道示意圖

圖(7)單T突張管道部分總長度跟管道寬度都跟單T管道一樣，差別在於管道交接處往下游100 μm 的地方管道，往外擴張100 μm 長度為100 μm 其餘部分跟單T管道一樣。

對突張與突縮T字型微管道內之流體流動，在當外加電場強度較小時，兩股流體分別由兩入口處被驅動往管道交接處匯流並往下游流動，液體介面的寬度會漸漸擴展，並朝下游形成擴散混合，並形成有層次的濃度分佈狀態。在未達臨界電場時，此分層流動現象會持續往下游流去。對於突張的T字型管道管道寬度為200 μm 時，當外加電場強度大於臨界電場強度值409 v/cm 時即產生電動不穩定現象，如圖(8)所示當外加電場的電場強度為454 v/cm (高於臨界值)時，特別在管道寬度較窄處，在流體的界面

上特別容易出現不穩定的擾動，並往下游逐漸放大。

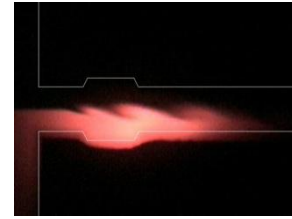


圖 8. 單T突張管道200 μm 454 v/cm 實驗圖

圖(9)所示是模擬兩種不同電導度的流體在定直流電場強度454 v/cm 偏壓下，流體電導度濃度分佈的暫態圖。藍色區域相當於低電導流體，而黃色區域代表高電導流體，在兩道流體的界面上出現較大的波動。出現在橫向與縱向上的不穩定流體導致兩種流體快速混合，此現象即為電動不穩定現象(EKI, electrokinetic Instability)。這些擾動愈往下游逐漸在形狀大小上擴大，並占滿整個管道形成-混沌狀態，微管道入口處將引發混沌不穩定現象在混合管道內。由模擬所得的流場電導度濃度分佈可得，在管道較窄處亦是較容易產生電動不穩定現象的位置。

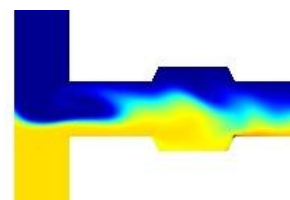


圖 9. 單T突張管道200 μm 454 v/cm 模擬圖

比較T型管道，管道寬度200 μm ，單突張、單突縮、雙突縮的流道形狀下的臨界電場強度，由表2實驗得知，單T管道其臨界電場強度為318 v/cm ，單突張管道管道其臨界電場強度為409 v/cm ，單突縮管道其臨界電場強度為300 v/cm ，雙突縮管道其臨界電場強度為237 v/cm ，對於單突縮管道，管道中有一段管道寬度較小，由於流體受管道壁面的影響，使得兩種液體受到

壁面擠壓的影響，在管道截面較窄處，流體間的電導度梯度較大，因此在此區域的流體界面上較容易產生電動不穩定的擾動現象。而對雙突縮的部分是因為管道內有兩處的凹進來管道寬度較小的壁面，使得兩個液體受壁面擠壓的影響，在界面處更容易產生不穩定的現象，此擾動並朝向出口前進，而兩種液體混合擾動現象最為明顯，且臨界電場強度相對的也是最小的。對於T型突張的管道，管道有一段是寬度較大的，因為管道的變寬使得液體接觸的電導度濃度梯度較小，因此臨界電場強度增大，而兩種液體混合擾動現象也較不明顯。

表 2. T型幾何管道臨界電場強度

T型幾何管道臨界電場強度		
管道型狀	實驗 v/cm	模擬 v/cm
單 T	318 v/cm	310 v/cm
單T突張	409 v/cm	315 v/cm
單T突縮	300 v/cm	305 v/cm
單T雙突縮	237 v/cm	300 v/cm

4. 結論

本論文首先進行單純 T 字形不同管道寬度的臨界電場強度實驗跟模擬，由實驗跟模擬中發現，管道寬度越小流體也受管道壁面的影響，使得兩種液體在受到壁面擠壓的影響，在管道截面較窄處，流體間的電導度梯度較大，因此在此區域的流體界面上較容易產生電動不穩定的擾動現象，且臨界電場強度相對的也是最小，各種不同單純 T 字形管道寬度臨界電場強度已歸納在表 1 中。

比較單 T 與單 T 突張、單 T 突縮管道中寬度一樣 $200\mu\text{m}$ 為例，單 T 臨界電壓為 318 v/cm、單 T 突縮管道臨界電壓為 300 v/cm、單 T 突張臨界電壓為 409 v/cm、T 雙突縮臨界電壓為 237 v/cm，在相同管道寬度比較下發現，因管道壁幾何的關係，原本的臨界電壓也會有所改變，若為突縮的管道其臨界電場強度為降低，而若為突張的管道其臨界電場強度為增加，所以說在 $200\mu\text{m}$ 為例臨界電場強度最低到最高分別為 T 雙突縮 < 單 T 突縮 < 單 T < 單 T 突張。

5. 參考文獻

1. Melcher J R, Taylor G I. "Electrohydrodynamics: a review of the role of interfacial shear stress", *Annu Rev Fluid Mech*, vol. 1, pp.111-146, 1969.
2. Saville D A., "Electrohydrodynamics: the Taylor-Melcher leaky dielectric model", *Annu Rev Fluid Mech*, vol.29, pp.27-64, 1997.
3. Baygents J C, Baldessari F., "Electrohydrodynamic instability in a thin fluid layer with an electrical conductivity gradient", *Phys Fluids*, vol.10, pp. 301-311, 1998.
4. Lin H, Storey B D, Oddy M H, Chen C H, Santiago J G., "Instability of electrokinetic microchannel flows with conductivity gradients", *Phys Fluids*, vol.16, pp.1922-1935, 2004.
5. Chen C H, Lin H, Lele S K, Santiago J G., "Convective and absolute electrokinetic instability with conductivity gradients", *J Fluid Mech*, vol.524, pp.263-303, 2005.
6. Tai C H, Yang R J and Fu L M., "Micromixer utilizing electrokinetic instability-induced shedding effect", *Electrophoresis*, vol.27, pp.4982-4990, 2006.
7. Pan Y J, Ren C M and Yang R J., "Electrokinetic flow focusing and valveless switching integrated with electrokinetic instability for mixing enhancement", *Journal of Micromech. Microeng*, vol.17, pp.820-827, 2007.
8. Luo W J, Yarn K F, Shih M H and Yu K C., "Microfluidic mixing utilizing electrokinetic instability stirred by electrical field intensity perturbations in a glass microchannel", *Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications*, vol.2, pp.117-125, 2008.
9. Luo W J., "Transient electro-osmotic flow induced by dc or ac electric fields in a curved micro-tube", *J. Colloid Interface Sci*, vol.278(2), pp.497-507, 2004.
10. Yang R J, Luo W J., "Flow bifurcations in a thin gap between two rotating spheres", *Theory Comput. Fluid Dyn*, vol.16, pp.115-131, 2002.
11. F. Zhang, Y. Daghighi and D. Li, "Control of flow rate and concentration in microchannel branches by induced-charge electrokinetic flow", *J.Colloid and Interface Sci*, 364, 588-593, 2011
12. C.C. Cho, C.L. Chen, C.K. Chen, "Mixing enhancement in crisscross micromixer using

- aperiodic electrokinetic perturbing flows”,
Int. J. Heat and Mass Transfer, 55, 2926-2933,
2012
13. C.C. Cho, C.L. Chen, C.K. Chen, “Mixing
enhancement of electrokinetically-driven
non-Newtonian fluids in microchannel with
patterned blocks”, Chemical Engineering
Journal, 191, 132-140, 2012